Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт электроники и телекоммуникаций

Высшая школа прикладной физики и космических технологий

Работа допущена к защите

директор ВШПФиКТ

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_А.Л. Гельгор

«\_\_\_\_» июня 2025 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

РАБОТА БАКАЛАВРА/МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ТЕМА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

по направлению подготовки 11.03.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Профиль 11.03.02\_01 – «Системы мобильной связи»

Выполнил

студент гр. 4931102/90401 И.О. Фамилия

Руководитель

должность, уч. степень, уч. звание И.О. Фамилия

Руководитель

должность, уч. степень, уч. звание И.О. Фамилия

Консультант по нормоконтролю И.О. Фамилия

Санкт-Петербург

2025

КОПИЯ ЗАДАНИЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Сюда вставляется задание на ВКР в электронном виде без подписей. Необходимо отследить, чтобы текст и линии задания «не съехали» на поля.

Реферат

На ХХ с., ХХ рисунков, ХХ таблиц, ХХ приложений

Ключевые слова: указать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста работы в именительном падеже строчными буквами, в строку, через запятые, без переноса слов, с точкой в конце.

**Тема выпускной квалификационной работы:** строчными буквами, первая буква названия заглавная, в кавычках.

Цель работы и решаемые задачи (в соответствии с заданием на выполнение ВКР)

Работа проведена на базе указать лабораторию/предприятие и т.п., где были произведены основные расчеты/измерения и т.п. Были проведены расчеты, измерения, анализ и т.п. Использовались методы, подходы, и т.п. В результате было получено, продемонстрировано, показано и т.п. Что может быть использовано … / позволяет рекомендовать / и т.п.

Примечание 1. Последним абзацем указать какие информационные технологии, в том числе программное обеспечение, облачные сервисы, базы данных и прочие использовались в процессе работы.

Abstract

XX pages, XX figures, XX tables, XX appendixes

**Keywords:** …

**The topic of the final qualifying work** is …

Раздел «Abstract» должен представлять собой перевод на английский язык раздела «Реферат».

ОГЛАВЛЕНИЕ

[СПИСОК аббревиатур, сокращений и обозначений 7](#_Toc198505074)

[Введение 8](#_Toc198505075)

[Глава 1. Многочастотные сигналы 9](#_Toc198505076)

[1.1. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов 9](#_Toc198505077)

[1.2 Ортогональное мультиплексирование ЛЧМ-сигналов 10](#_Toc198505078)

[1.3 Цель и задачи 12](#_Toc198505079)

[Глава 2. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ И ПРИёМА СИГНАЛОВ С OCDM МОДУЛЯЦИЕй 13](#_Toc198505080)

[2.1 Преобразование Френеля 13](#_Toc198505081)

[2.2 Прямой метод 14](#_Toc198505082)

[2.3 Формирование при помощи преобразования Френеля 18](#_Toc198505083)

[2.4 Матричное описание системы с OCDM 19](#_Toc198505084)

[2.5 Вычислительно эффективная модель передатчика OCDM 19](#_Toc198505085)

[Глава 3. Имитационное моделирование 20](#_Toc198505086)

[3.1. Описание имитационной модели 20](#_Toc198505087)

[3.2 Результаты имитационного моделирования 24](#_Toc198505088)

[3.2.1 Сравнение помехоустойчивости в канале с АБГШ 24](#_Toc198505089)

[3.2.2 Помехоустойчивость приема в частотно-избирательные каналы 25](#_Toc198505090)

[3.2.3 Частотно-избирательные каналы при наличии расстройки несущей частоты 28](#_Toc198505091)

[Заключение 30](#_Toc198505092)

[Список использованных источников 31](#_Toc198505093)

[Приложение А. Название приложения 32](#_Toc198505094)

[А.1. Название первого раздела приложения 32](#_Toc198505095)

[А.2. Название второго раздела приложения 32](#_Toc198505096)

СПИСОК аббревиатур, сокращений и обозначений

Применяются следующие аббревиатуры и сокращения:

АФАР – активная фазированная антенная решетка.

БНПА – беспилотный необитаемый подводный аппарат.

МНК – метод наименьших квадратов.

Применяются следующие обозначения:

*Ci* – модуляционный символ.

*h*2 – значение отношения сигнал/шум.

Введение

Во введении необходимо пояснить выбранную тематику работы, очень кратко пояснить современное состояние рассматриваемых вопросов, актуальность, практическую и (или) теоретическую значимость работы.

Во введении указываются цель и задачи работы (в соответствии с заданием на выполнение ВКР).

Введение может содержать исходные данные для выполнения работы, могут быть указаны методы решения поставленных задач, методы измерения и т.п. и пояснен их выбор.

Рекомендуемый объем введения – не менее одной страницы и не более трех страниц.

Глава 1. Многочастотные сигналы

* 1. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов

В технологии OFDM последовательный поток данных передается одновременно (параллельно) через N каналов при помощи совокупности ортогональных поднесущих. Ортогональность между поднесущими достигается при помощи выбора соответствующего частотного разноса, благодаря которому максимум спектра каждой поднесущей совпадает с нулями спектров остальных поднесущих, что приводит к устранению межканальной интерференции.

Изображение выглядит как линия, диаграмма

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Рисунок – Спектры: a) одна поднесущая OFDM сигнала, б) OFDM сигнал [картинка и подпись из Бакулина]

В работе [3] 1971 года Эберт и Вейнстейн предложили использовать ДПФ для модуляции и демодуляции в системах параллельной передачи данных. В современных системах применяется формирование и обработка сигнала на основе БПФ, что позволяет экономить ресурсы необходимые для реализации алгоритмов. Передаваемый во временной области OFDM символ описывается следующим выражением:

где *s(n)*– *n*-ый передаваемый OFDM символ,

*k* – индекс поднесущей,

*N* – количество поднесущих,

*x*k – модуляционный символ, передаваемый на *k*-ой поднесущей.

В результате прохождения сигнала через многолучевой канал может возникать межсимвольная интерференция, для борьбы с которой для каждого символа *x*k вводится циклический префикс (CP) – циклическое расширение, достигаемое добавлением в начало символа копии некоторого числа последних отсчётов, как показано на рисунке 2.

Изображение выглядит как текст, зарисовка, линия, Шрифт

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Рисунок – Демонстрация CP

Длина циклического префикса выбирается большей, чем максимальная задержка в канале, так как в этом случае задержанные копии OFDM-символа будут иметь целое число периодов внутри интервала БПФ.

Написать про недостатки OFDM: сделать упор на ограничение в системах с высокой мобильностью и потерю ортогональности из-за допплера

1.2 Ортогональное мультиплексирование ЛЧМ-сигналов

Схема OCDM похожа на OFDM в том плане, что последовательный поток данных передается параллельно через N каналов, однако если в OFDM поднесущими называются колебания, разнесенные по частоте, то в OCDM поднесущие – это один и тот же ЛЧМ-сигнал, называемый «корневым», с различным сдвигом по фазе, таким образом, что поднесущие оказываются ортогональны друг другу. На рисунке 3 приведены изображения поднесущих в OFDM и OCDM.

Изображение выглядит как текст, График, диаграмма, линия

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Рисунок – Поднесущие в OFDM и OCDM

Дискретное описание OCDM символа, передаваемого во временной области приведено следующим образом

В (N) *s*(*n*) – *n*-ый передаваемый OCDM символ,

*N* – количество поднесущих,

*k* – индекс поднесущей,

*x*(*k*) – модуляционный символ, передаваемый на *k*-ой поднесущей.

Очевидно, что каждый ЛЧМ-сигнал занимает всю отведенную полосу за счет чего оказывается устойчивым к различным деструктивным эффектам, среди которых, например, многолучевое распространение и эффект Допплера. [стоит ли это оставлять?].

[Что тут писать дальше, как бы подвести это к цели и задачам? Надо бы по-хорошему наверно расписать про то, почему это более устойчиво к CFO?]

В отл от OFDM засчет своей структуры лчм-сигнал оказывается более устойчив (ссылки на источники) к негавтиным эффектам, более того оказывается выигрыш в разных плохих ситуациях энергетический выигрыш имеет место, не теряя в спектральной эффективности и не прогирывая по пик-фактору, но в некоторых сценариях (высокая мобильность, гидроакустика, оптические системы, побольше ссылок) оказывается более привлекательной (сохраняя в себе преимущества OFDM). Про вычислительные сложности, что алгоритмы не сильно сложее.

В литературе достаточно много внимания уделено математическому моделированию приемопередающих систем с использованием сигналов OCDM, однако практически [или совсем] не описываются реальные системы с использованием таких сигналов, нет описания их реальных физических свойств (спектр) и нет исследований, касающихся прохождения такими сигналами через реальные каналы связи. Недостаток экспериментальных исследований и результатов, малое внимание уделяется особеннастям практических реализаций таких системы на базе совремнных вычислительных системы (например SDR).

1.3 Цель и задачи

Таким образом, [цель и задачи]

Глава 2. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ И ПРИёМА СИГНАЛОВ С OCDM МОДУЛЯЦИЕй

[краткий рефератик, преобразование Френеля, прямое формирование, с помощью преобразования Френеля, матричное описание системы (с описанием эквалайзера), вычислительно-эффективная модель передатчика]

2.1 Преобразование Френеля

Преобразование Френеля – интегральное преобразование, берущее начало из оптики и описывающее оптическую дифракцию в ближнем поле. Когда монохроматическая плоская волна с длиной волны *λ* натыкается на щель (решетку), чей размер сравним с *λ*, результирующая дифракционная картина на пластине на расстояние *z* описывается уравнением 3

где (∙) – обозначение преобразование Френеля с параметром *a=λz,* обозначающимнормированной дистанцией Талбота (расстояние Талбота? Изучить вопрос),

*s(t)* – коэффициент пропускание решетки.

Ядром преобразования Френеля является уравнение 4

Важным свойством преобразования Френеля является то, что преобразование Френеля от линейной свертки является сверткой одного с преобразованием Френеля другого, что показано в уравнении (5). [ссылка на источник “Why Fresnel is so little known?” 1994, Gori]

Это свойство отличается от свойства преобразования Фурье, которое заключается в том, что преобразование Фурье от свертки равно произведению преобразований Фурье.

Дискретная форма преобразования Френеля, DFnT, связана с эффектом Талбота, который представляет собой периодическую решётку дифракции Френеля [источник]. Матрица DFnT даёт коэффициенты поля изображения Талбота, или так называемого автоизображения на расстоянии Талбота z =  ZT/N,

где = d2/λ – расстояние Талбота, d – расстояние между повторяющимися решётками.

В работе [2] элемент (m, n) матрицы дискретного преобразования Френеля **Φ** размером N на N определяется следующим образом

Матрица дискретного преобразования Френеля обладает рядом важных свойств, таких как унитарность и способность к разложению на собственные векторы. Остальные свойства описаны в [2].

2.2 Прямой метод

Для применения преобразования Френеля из оптики в OCDM необходимо выполнение некоторых условий. Во-первых, ЛЧМ-сигналы должны быть ограничены по времени. Во-вторых, пространственный эффект Талбота преобразуется во временной для OCDM. На основе уравнения (6) мы определяем временной аналог расстояния Талбота *Z*T следующим образом

где T – период ЛЧМ-сигнала.

Предположим, что имеется *N* ЛЧМ-сигналов. Подставив долю расстояния Талбота *z* = *Z*T/*N* в уравнение (4), можно получить временной период Талбота . Подставив *a* в уравнение (4), получаем "базовый"/”корневевой” ЛЧМ-сигнал:

где

прямоугольный импульс.

Можно получить набор из *N* ЛЧМ-сигналов, используя корневой ЛЧМ-сигнал, тогда *k*-ый (*k* = 0, 1, …, N-1) ЛЧМ-сигнал определяется как [слишком много слова ЛЧМ-сигнал]

Наглядное представление из 16 таких чирпов представлено на рисунке 2

Рисунок по-хорошему вообще-то нужно переделать

Изображение выглядит как линия, График, диаграмма, Красочность

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Рисунок

Можно легко доказать, что ЛЧМ-сигналы взаимно ортогональны

В системе OCDM амплитуда и фаза каждого ЛЧМ-сигнала могут быть использованы для модуляции. Таким образом, могут применяться такие методы модуляции, как АМ, ФМ и КАМ. На каждую поднесущую в мультиплексированном сигнале отображается советующий модуляционный символ для возможности передачи информации. Подобно OFDM-символам, которые передаются блоками, модулированные ЛЧМ-сигналы также передаются блоками. В блоке OCDM *k*-й символ, модулирующий *k*-й ЛЧМ-сигнал, обозначается как . Временное описание OCDM символа, переносящего в себе N комплексных модуляционных символов, может описано следующим выражением

[Согласно (11), *x*(*m*) может быть получен с помощью согласованного фильтра к *m*-ому ЛЧМ-сигналу.] исправить

В ходе процедуры приема, для выделения m-го модуляционного может применяться согласованный вид….

Таким образом, прямые процедуры формирования и приема в системе OCDM можно представить так, как это показано на рисунке 4.

Изображение выглядит как диаграмма, План, линия, Технический чертеж

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Рисунок – а) формирование б) обработка

2.3 Формирование при помощи преобразования Френеля

Стоит заметить, что дискретное преобразование Френеля определено по-разному в выражении (5) для четных и нечетных значений *N*, следовательно, дискретный OCDM сигнал также будет определен по-разному для четных и нечетных значений *N* (уравнение 14 и 15, соответственно)

Если сравнить выражения 14 и 15 с определением дискретного преобразования Френеля, можно увидеть, что описанные представления OCDM-сигнала есть ничто иное как обратное дискретное преобразование Френеля (IDFnT). Таким образом, формирование необходимого набора дискретизированных модулированных ЛЧМ-сигналов может быть реализовано с помощью IDFnT.

Выразим уравнения 12 и 13 в матричной форме, для этого объединим символы в векторную форму следующим образом

Тогда дискретный OCDM сигнал во временной области будет описан уравнением 14

Учитывая, что матрица дискретного преобразования Френеля унитарная, в приемнике принятые символы можно восстанавливать с помощью обратной операции, то есть с помощью преобразования Френеля

2.4 Матричное описание системы с OCDM

Не знаю надо ли здесь вставлять картинку со структурной схемой, где выход из каждого блока подписан своим вектором. Вообще спорный момент, с чего начинать? С самого начала? Тогда нужно заранее объяснять как эквалайзер работает. Выделяем векторы жирным?

Сигнал ***r*** на входе приемника описывается следующим выражением

где *H* – матрица импульсного отклик канала,

*n* – вектор АБГШ.

Прежде чем восстанавливать переданные символы стоит компенсировать влияние канала, а затем применить дискретное преобразование Френеля, как это показано в уравнении (17). Возможно также сначала произвести преобразования Френеля над принятым сигналом ***r*** и затем заниматься компенсацией влияния канала. Такой вариант описывается следующим образом:

В таком виде ЛЧМ-сигналы оказываются как бы невидимыми для канала так, как если бы модуляционные символы передавались напрямую. Стоит также упомянуть, что благодаря унитарности матрицы дискретного преобразования Френеля вектор помех остается АБГШ. А нужно ли вообще все это? Или можно просто рассказать про эквализацию.

Авторы [1] предлагают алгоритм эквализации в частотной области, при котором дискретное преобразование Френеля в приёмнике не требуется.

Изображение выглядит как диаграмма, текст, План, Технический чертеж

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Рисунок – Структурная схема эквалалайзера

Предлагается вместо дискретного преобразования Френеля подвергнуть OCDM-сигнал ДПФ, подвязать к следующему выражению:

где **F** – нормализованная матрица ДПФ.

Используя , можно переписать предыдущее выражение в следующем виде

где – матрица частотного отклика канала,

– матрица коэффициентов.

Матрицы и диагональны (доказывается в [1]), причём *k*-ый элемент на диагонали матрицы описывается следующим выражением

Используя коммутативное свойство произведения двух диагональных матриц, выражение (20) можно переписать следующим образом

Прежде чем компенсировать влияние канала происходит поворот фазы, обратный тому, который вносится , путем умножения на матрицу . Тогда эквализованный сигнал будет описываться выражением (24)

где **G** – диагональная матрица, где каждый *k*-ый диагональный элемент G(*k*) представляет собой коэффициент эквалайзера.

Для **zero-forcing** эквалайзера, рассматриваемого в этой работе, элемент G(*k*) описывается выражением (25)

Впоследствии, над сигналом производится ОДПФ, после чего сигнал можно подвергать демодуляции.

2.5 Вычислительно эффективная модель передатчика OCDM

Одним из достоинств OCDM считается [1], [когда вставишь еще источники добавишь], что этот вид модуляции можно реализовать с помощью систем, разработанных под OFDM с некоторыми изменениями. Основанием этому служит связь дискретных преобразований Фурье и Френеля, которая будет рассмотрена в этом подразделе.

Итак, ядром ДПФ служит выражение (26)

а ядром дискретного преобразования Френеля – выражение (27)

Можно заметить, что дискретное преобразование Френеля в (27) состоит из ДПФ с дополнительными квадратичными фазами 1 и 2, описываемыми выражениями (28) и (29), соответственно

Таким образом, дискретное преобразование Френеля можно выполнить на основе ДПФ в три шага:

1. умножение на матрицу поворота фазы 1,
2. использование ДПФ
3. умножение на матрицу поворота фазы 2.

Аналогично, можно выполнить и обратное дискретное преобразование Френеля, если проделать эти шаги в обратном порядке и вместо ДПФ применить ОДПФ.

Поскольку матрицы 1 и 2 – диагональные, а ДПФ и ОДПФ можно эффективно выполнять при помощи БПФ, такой метод оказывается вычислительно эффективнее, чем метод, описанный ранее, так как он требует умножение на матрицу.

Глава 3. Имитационное моделирование

[Наверное, здесь должно быть словесное описание модели с различными параметрами, которые использовались: выбор вида модуляции, количество поднесущих и тд].

3.1. Описание имитационной модели

Для оценки эффективности работы системы с OCDM в различных каналах связи, а также для проведения сравнения помехоустойчивости приёма с сигналами OFDM в программном пакете MATLAB была разработана имитационная модель приемопередающей системы. На рисунке 6 представлена структурная схема имитационной модели.

Изображение выглядит как диаграмма, План, Технический чертеж, схематичный

Контент, сгенерированный ИИ, может содержать ошибки.

Рисунок – Структурная схема имитационной модели

[Стоит ли на одной схеме и OFDM и OCDM? Правильно ли я оценку канала вставил? Нужно ли что-то про нулевые поднесущие?]

[Возможно стоит сделать таблицу, куда будут сведены все параметры модели: кол-во поднесущих, длина CP и тд]

В самом начале происходит инициализация параметров модели: количество поднесущих, тип модуляции, размер созвездия, значение частотного сдвига (в том числе нулевой сдвиг), длительность циклического префикса и тд. [во-первых, добавить все; во-вторых, нужно ли перечислять те параметры, про которые исследования не проводились (количество поднесущих не менялось, длительность циклического префикса везде одинаковая и тд)]. Затем происходит генерация псевдослучайной последовательности информационных битов, после чего происходит их отображение на модуляционные символы. Затем происходит разделение: для сигналов OFDM над модуляционными символами производится обратное быстрое преобразования Фурье, для OCDM – обратное дискретное преобразование Френеля. В данной модели преобразование было осуществлено при помощи умножения на матрицу, так как MATLAB позволяет выполнять матричные операции без значительной траты ресурсов. Далее идет добавление циклического префикса. Следующим шагом является выбор профиля частотно-избирательного канала:

1. Отсутствие замираний
2. Расширенная модель движения пешехода типа A (*Extended Pedestrian A – EPA*)

Таблица – Параметры модели канала EPA

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Луч | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Задержка, нс | 0 | 30 | 70 | 80 | 110 | 190 | 410 |
| Средняя относительная мощность, дБ | 0 | -1 | -2 | -3 | -8 | -17.2 | -20.8 |

1. Расширенная модель движения автомобиля типа A (*Extended Vehicular A – EVA*)

Таблица – Параметры модели канала EVA

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Луч | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Задержка, нс | 0 | 30 | 150 | 310 | 370 | 710 | 1090 | 1730 | 2510 |
| Средняя относительная мощность, дБ | 0 | -1.5 | -1.4 | -3.6 | -0.6 | -9.1 | -7 | -12 | -16.9 |

1. Расширенная модель в условиях типичной городской застройки (*Extended Typical Urban – ETU*)

Таблица – Параметры модели канала ETU

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Луч | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Задержка, нс | 0 | 50 | 120 | 200 | 230 | 500 | 1600 | 2300 | 5000 |
| Средняя относительная мощность, дБ | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | -0 | -3 | -5 | -7 |

Затем добавляется АБГШ и при необходимости частотный сдвиг. Затем удаляется циклический префикс и оба сигнала подвергаются БПФ, после чего снова происходит разделение: для OCDM дополнительно предусмотрено умножение на матрицу поворота фазы. Следующим шагом является эквализация с помощью оценки канала, полученной от деления исходных модуляционных символов на те, которые получились после ДПФ (и поворота фазы, в случае OCDM). После чего происходит демодуляция и расчет битовой ошибки.

3.2 Результаты имитационного моделирования

3.2.1 Сравнение помехоустойчивости в канале с АБГШ

Результат моделирования в канале с АБГШ приведен на рисунке 8. Зависимость битовой ошибки от отношения сигнал/шум OCDM сигнала при использовании QPSK ложится на потенциальную кривую помехоустойчивости, что подтверждает адекватность работы имитационной модели и корректность программной реализации алгоритмов формирования и приема.

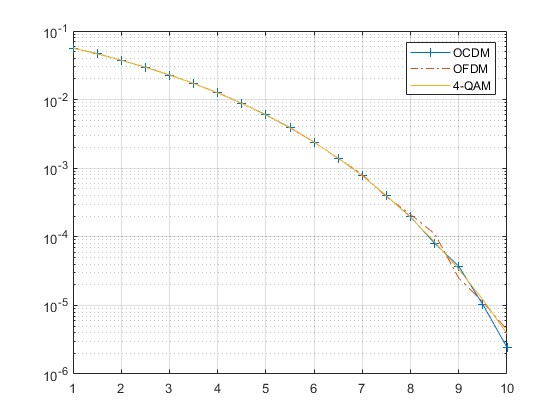


Рисунок – Сравнение помехоустойчивости OCDM и OFDM в канале с АБГШ

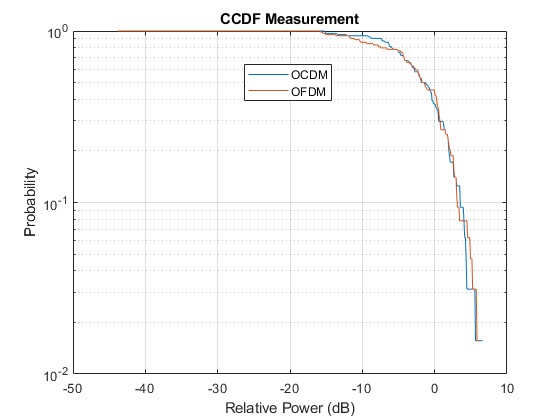


Рисунок – Сравнения пик-фактора OCDM и OFDM

[Что-то про проведение моделирования и как это работает, я пока не очень понимаю]. Из рисунка 9 видно, что пик-факторы для OCDM и OFDM практически не различаются. В публикациях показано (ссылка на статью с теоретическим расчетом) что пик-факторы совпадают, мы это проверили.

И пик-фактор и спектр должен показывать адекватность модели (спектр можно пивелч)

3.2.2 Помехоустойчивость приема в частотно-избирательные каналы

Вернуться к предыдущим результатам

Для какого-нибудь результата вставить ссылку и написать что совпадает характер или просто результат

30-35 дБ максимум.

На рисунках 9…11 приведены сравнения результатов моделирования OFDM и OCDM в моделях каналов EPA, EVA и ETU с соответствующими скоростями изменения каналов. Из результатов видно, что есть определенное пороговое значение Eb/N0, до которого вероятность битовой ошибки OCDM выше, чем у OFDM. Однако, после этого значения скорость убывания вероятности битовой ошибки оказывается выше, чем у OFDM. Для «пешеходной» модели канала EPA, результаты моделирования которого приведены на рисунке 9, это пороговое значение составляет 10 дБ.

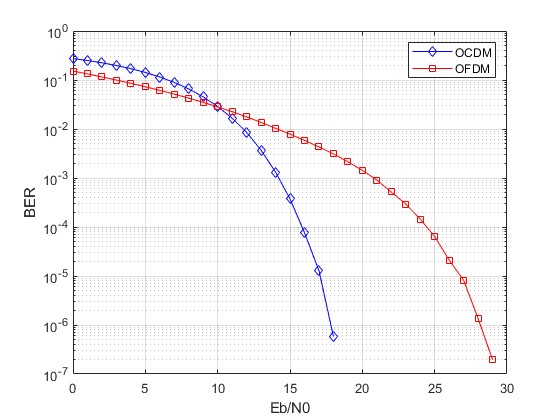


Рисунок – EPA 5 Hz

Для модели движения в транспорте результаты моделирования которой приведены на рисунке 10, таким пороговым значением является 8 дБ [бред,… до этого 18 было].

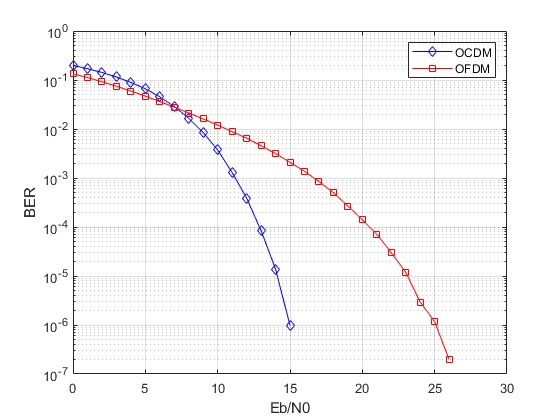


Рисунок – EVA 70 Hz

На рисунке 11 приведен результат моделирования для модели канала типичной городской застройки. Пороговым значением отношения Eb/N0 для этой модели канала при сравнении OCDM с OFDM является 11 дБ. Для обеих схем модуляции проявляется эффект насыщения для вероятности битовой ошибки [на этой картинке нет, но без добавления изменения скорости канала было для обоих], для OFDM граничная вероятность битовой ошибки составляет , для OCDM – [переделать и получить нормальные данные]

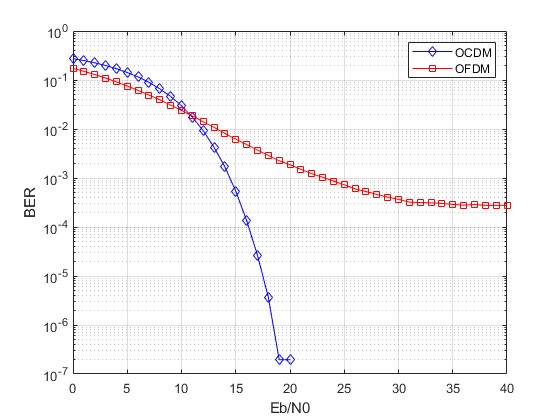


Рисунок – ETU 300 HZ

3.2.3 Частотно-избирательные каналы при наличии расстройки несущей частоты

[термин взят из Бакулина; теория в целом взята из Бакулина «Технология OFDM», «LTE the UMTS long term evolution…» и статей по OCDM]

Расстройка несущей частоты (CFO – Carrier Frequency Offset) – эффект, возникающий при отсутствии синхронизации гетеродина преобразователя частоты приемника и несущей частоты принятого сигнала. Причинами такого явления может служить как рассогласование частот генераторов в передатчике и приемнике, так и эффект Допплера, возникающий вследствие движения приемника или передатчика (что характерно, для мобильной связи). Если этот эффект имеет место, то принятый сигнал оказывается сдвинут по частоте, как показано на рисунке 12 [картинка из Бакулина, заменить на свою].

Для OFDM ортогональность между поднесущими опирается на то условие, что приемник синхронизирован с частотой несущей. Если это не выполняется, то ортогональность между поднесущими теряется и имеет место межканальная интерференция, которая негативно влияет на помехоустойчивость приема. [слишком много слова поднесущая]

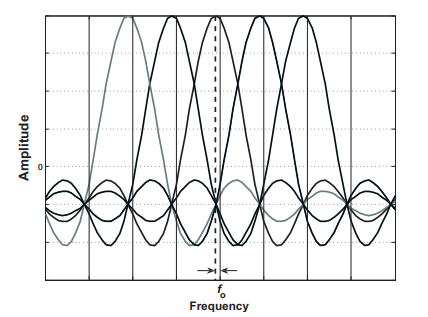


Рисунок – Влияние CFO на поднесущие

Если обозначить *ε* за значение нормализованной частотной расстройки, то CFO можно выразить через выражение *N*

где – частотный диапазон поднесущей, – частотная расстройка.

[Получается, вся выгода в том, что в OFDM несущие налезают друг на друга и теряют ортогональность, в OCDM символ занимает всю полосу и ортогональность там зависит не от этого, то есть им это меньше страшно]

[Вот это значение неккоректно использовать по отношению к OCDM, но при сравнении OFDM и OCDM получается корректно, т. к. означает одинаковый частотный свдиг. Стоит ли заострять на этом внимание?]

Заключение

Здесь нужно сформулировать заключение по ВКР, которое должно содержать:

* краткое перечисление основных результатов, полученных в работе;
* оценку полноты решений поставленных задач;
* рекомендации по использованию результатов;

Рекомендуемый объем заключения – не более двух страниц.

Список использованных источников

1. X. Ouyang and J. Zhao, "Orthogonal Chirp Division Multiplexing," in IEEE Transactions on Communications, vol. 64, no. 9, pp. 3946-3957, Sept. 2016, doi: 10.1109/TCOMM.2016.2594792.

2. X. Ouyang, C. Antony, F. Gunning, H. Zhang, and Y. L. Guan. (2015).“Discrete Fresnel transform and its circular convolution.” [Online].Available: http://arxiv.org/abs/1510.00574

3. S. Weinstein and P. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform," in *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, October 1971, doi: 10.1109/TCOM.1971.1090705.

.

Приложение А. Название приложения

А.1. Название первого раздела приложения

………………………………………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………………………………………..

А.2. Название второго раздела приложения

………………………………………………………………………………………………………………………………

………………………………………………………………………………………………………………………………..